



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Validación de sensores radiométricos low cost para la monitorización del estrés hídrico del viñedo

Autor/es

MARÍA MARTÍNEZ SÁEZ

Director/es

MARÍA PAZ DIAGO SANTAMARÍA y MANUEL JAVIER TARDÁGUILA LASO ,

Facultad

Facultad de Ciencia y Tecnología

Titulación

Grado en Enología

Departamento

AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN

Curso académico

2018-19



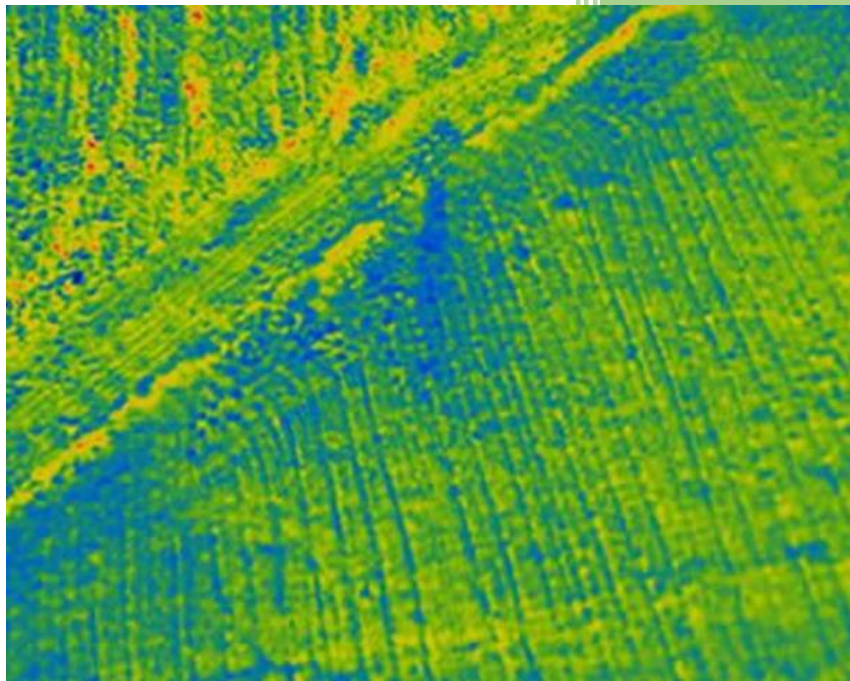
Validación de sensores radiométricos low cost para la monitorización del estrés hídrico del viñedo, de MARÍA MARTÍNEZ SÁEZ
(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

TRABAJO FIN DE GRADO

VALIDACIÓN DE SENSORES RADIOMÉTRICOS LOW COST PARA LA MONITORIZACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO DEL VIÑEDO



MARÍA MARTÍNEZ SÁEZ

TUTORES

MARÍA PAZ DIAGO SANTAMARÍA

MANUEL JAVIER TARDÁGUILA LASO

CURSO: 2018-2019

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Logroño, junio de 2019

RESUMEN

La influencia del agua sobre la calidad y la producción de la vid hace que el estudio de la cantidad de agua disponible para la planta sea fundamental en viticultura. El objetivo de este trabajo es validar sensores de bajo coste basados en termografía, que permitan la monitorización del estrés hídrico del viñedo, y estudiar cómo pueden influir determinadas condiciones en el uso de estos sensores.

Para la validación de los sensores radiométricos de bajo coste se hicieron ensayos en dos viñedos experimentales diferentes, en los cuales se estudió la relación entre las medidas de potencial hídrico obtenidas empleando la cámara de Scholander, con las medidas de potencial hídrico predichas empleando un sensor radiométrico que mide la temperatura de la espaldera. Uno de los ensayos de validación se llevó a cabo en un viñedo experimental situado en Tudelilla, en el que habían sido impuestos diferentes tratamientos de riego. La otra parte de la validación se realizó en un viñedo comercial situado en Portugal.

Para el tratamiento de datos de ambos viñedos se realizaron correlaciones lineales entre los potenciales hídricos y la temperatura, y con diferentes índices térmicos, pero se observó que la correlación no era lo suficientemente buena. Para mejorar estos resultados, se realizó un análisis multivariante teniendo en cuenta variables externas. Con el análisis multivariante se obtuvieron buenas correlaciones entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander y el potencial hídrico predicho.

La última parte del trabajo se realizó en el viñedo de Corazonistas, y consistió en estudiar la influencia de condiciones como la porosidad de la vegetación o la influencia de filas adyacentes en la toma de datos con el sensor radiométrico. En esta parte se comprobó que no existían diferencias significativas debidas a esas dos condiciones a la hora de obtener los datos.

Como conclusión general se comprobó que la temperatura de la vegetación tiene relación con el potencial hídrico, pero a la hora de predecirlo utilizando las medidas de temperatura obtenidas gracias al sensor radiométrico, hay que tener en cuenta también otros factores externos que ayudan a mejorar los resultados.

ABSTRACT

The relevant role of water in vine production and quality makes the quantification of its availability in the plants essential in viticulture. For this reason, the goal of this project has been the validation of thermography-based low-cost sensors for monitoring hydric stress in vineyards, as well as the determination of external factors that can alter their use.

The work was performed in two different vineyards. One of them is an experimental vineyard located in Tudelilla that was subject to different irrigation treatments. The other is a commercial vineyard located in Portugal. To validate the low-cost sensors the relationship between the hydric potential measurements obtained by using Scholander camera and the ones obtained by a radiometric sensor that check trellis temperature was studied.

For data processing, linear correlations between hydric potentials and temperature, by using different thermic index were performed. However, the correlation between those parameters was not good enough, so that to improve these results a multivalent analysis considering external variables was approached. This new strategy provided good correlations between the data obtained through the measurement of the hydric potential using the Scholander camera and the estimated hydric potential.

Finally, the influence of parameters such as the vegetation porosity or adjacent row effects in the measurements of the radiometric sensors were studied, this part of the project was performed in the vineyard of Corazonistas. The analysis concluded that these two parameters do not have any effect on the data obtained by this kind of sensors.

In view of the results, there is clear evidence that vegetation temperature is related to the hydric potential. However, for hydric potential prediction by using a radiometric sensor it is important to consider other external factors that can help to improve the results.

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. IMPORTANCIA DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA VID	3
1.2. INDICADORES DEL ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO.....	3
1.3. LA TERMOGRAFÍA.....	6
1.4. CÁMARAS Y SENSORES TÉRMICOS.....	7
2. OBJETIVO	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	15
3.2. ADQUISICIÓN DE LAS MEDIDAS DE TEMPERATURA	17
3.3. MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO	18
3.4. INFLUENCIA DE LA POROSIDAD Y LAS FILAS ADYACENTES	19
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
4.1. VALIDACIÓN DE SENSORES RADIOMÉTRICOS DE INFRARROJO PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL HÍDRICO:.....	23
4.2. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA POROSIDAD Y LA PRESENCIA DE FILAS ADYACENTES EN LA MEDIDA DEL POTENCIAL HÍDRICO CON SENSORES RADIOMÉTRICOS:	33
5. CONCLUSIONES	37
6. BIBLIOGRAFÍA	41

1.INTRODUCCIÓN

1.1. IMPORTANCIA DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA VID

La vid es un cultivo con unas necesidades hídricas pequeñas, pero a pesar de ello, el agua es un factor clave para conseguir uvas de calidad (Sousa *et al.*, 2002). En climas áridos y semiáridos la disponibilidad de agua es el factor más limitante de la productividad del viñedo, y puede provocar reducciones del rendimiento y de la acumulación de azúcares en la cosecha (Santesteban *et al.*, 2011).

Históricamente el objetivo principal de los viticultores era aumentar la productividad, pero eso hoy en día ha cambiado, ya que ahora se persigue la obtención de calidad regulando la producción de manera eficaz y competitiva. Una forma de obtener esta calidad es regulando la cantidad de agua necesaria para cada planta.

El principal efecto debido a cantidades excesivas de agua en la vid es el aumento de la producción, lo cual puede afectar a la calidad de los vinos, ya que habrá una mayor densidad foliar y un mayor vigor por lo que se ocasionará sombra en los racimos, y además se podrían ver afectados el color y la concentración de azúcares en las bayas (Neja *et al.*, 1977). Por otro lado, la falta de agua puede ocasionar un cierre de los estomas, y por tanto una disminución de la fotosíntesis, y también una disminución de la calidad (Chaves *et al.*, 2007). Incluso, en algunos casos puede producirse senescencia en las hojas impidiendo la fotosíntesis y la maduración de los frutos. La solución sería un riego adecuado que permita el desarrollo vegetativo óptimo para mejorar la calidad de las uvas (R. Dry *et al.*, 2001).

Además, las necesidades hídricas de la vid varían a lo largo de su ciclo vegetativo, siendo más importantes desde la brotación hasta envero, ya que es una etapa de crecimiento de la planta (Miller and Klute, 1967) y es fundamental para conseguir que la superficie foliar expuesta/producción sea óptima. Sin embargo, durante la maduración es conveniente una situación de escasez de agua (Hardie and Considine, 1976).

Debido al calentamiento climático, se espera que aumenten en todo el mundo las temperaturas medias, por lo que también aumentarán las regiones áridas y la disponibilidad de agua será uno de los principales problemas en estas regiones, ya que el crecimiento de las plantas se verá limitado (Hallett, 2002). Esto hace que sea muy interesante la gestión adecuada del agua debido a su escasez, por lo que es recomendable implementar sistemas de riego de precisión basándose en informes de la cantidad de agua que necesita el cultivo en cada momento (Gutiérrez *et al.*, 2018a).

1.2. INDICADORES DEL ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO

Evaluar el estado hídrico del viñedo de manera adecuada es muy importante, ya que un cálculo inadecuado puede disminuir la eficiencia de la programación del riego.

1.2.1. **CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN BASADA EN LA DEMANDA ATMOSFÉRICA**

Una forma de medir el estado hídrico de un viñedo es mediante el método basado la demanda atmosférica. Este método se basa en la capacidad que tiene la atmósfera para absorber agua del cultivo y está condicionado por la temperatura y por la humedad del aire. Se mide a través del valor de la evapotranspiración potencial (ET_0) que indica la demanda atmosférica que hay en cada momento. La metodología más usada para calcular esto es la que describe la FAO (Pereira *et al.*, 2015).

Este método sirve para calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc) y se calcula por medio del producto entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (Kc), que varía según el cultivo del que se trate.

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

El coeficiente de evapotranspiración de referencia (ET_o) que proporcionan las diferentes estaciones meteorológicas recoge las condiciones climáticas que experimenta el cultivo, mientras que el coeficiente de cultivo Kc expresa el estado de desarrollo de cada cultivo.

1.2.2. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO

Otra manera de conocer el estado hídrico de un viñedo es empleando medidas basadas en la humedad del suelo. Existen varias formas de medir la cantidad de agua en el suelo, de manera directa o de manera indirecta midiendo alguna característica relacionada con el contenido de humedad del suelo (Angella *et al.*, 2016).

El método gravimétrico es una forma de medir directamente el contenido de agua en el suelo y consiste en medir el peso de agua contenido en una muestra de suelo, para calcular el porcentaje gravimétrico del agua (Θ_g). Para ello se emplea la siguiente fórmula:

$$\Theta_g = \frac{\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}}{\text{Peso suelo seco}} \times 100$$

Otros de los métodos que pueden emplearse son los métodos indirectos como:

- **Dispersión de neutrones:** Se basa en la emisión de neutrones por medio de una sonda. Los neutrones penetran en el suelo y van chocando con los núcleos de distintos elementos y se desaceleran. El hidrógeno desacelera estos neutrones rápidamente, y a su vez es el componente fundamental del agua, por lo que se relacionan el número de neutrones que regresan a la sonda con la humedad del suelo (Calvache Ulloa, 2002).
- **Sensores de capacitancia:** Se basa en relacionar los cambios en la constante dieléctrica con la humedad del suelo. Para ello se usa un dispositivo electrónico que se instala en el suelo, y mide la humedad y la temperatura del suelo. La mayoría de los materiales del suelo tienen una constante dieléctrica baja, sin embargo, el agua tiene una constante dieléctrica de 80, por tanto, un aumento de la constante dieléctrica se puede relacionar con un aumento de la humedad del suelo. Estos sensores son de fácil manejo y relativamente baratos (Ritter and M. Regalado, 2019).
- **Potencial matricial del suelo:** Es necesario el uso de un tensiómetro que tiene una cápsula porosa y se introduce a la profundidad deseada, de tal forma que el aparato se llena de agua destilada y se cierra herméticamente para que este se equilibre con el suelo en términos de potencial. De tal forma que cuando el suelo se seca succiona agua generando dentro del sistema una tensión que va aumentando conforme el suelo tiene menos cantidad de agua (Calvache Ulloa, 2002).

- **Resistencia eléctrica:** Este método se basa en que la diferencia entre dos electrodos contenidos en un material poroso. Se basan en la resistencia a la transmisión de corriente eléctrica a través de sus electrodos que varía con el potencial hídrico, de manera que cuánto más humedad haya la resistencia entre ambos electrodos será menor (Calvache Ulloa, 2002).

Todos estos métodos que miden la cantidad de agua en el suelo tienen la ventaja de que son fáciles de aplicar, son bastante precisos y fáciles de automatizar, pero por el contrario tienen la desventaja de que el suelo normalmente es muy heterogéneo y por tanto requiere un extenso programa de monitorización. Además, estas medidas no suelen ser representativas de la cantidad de agua que hay en la zona de la raíz (Jones, 2004), que es la más accesible a la cepa.

1.2.3. MÉTODOS BASADOS EN ESTIMAR EL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA

Finalmente, otra forma de conocer el estado hídrico de un viñedo es por medio de los métodos basados en la planta. Algunos de estos métodos son:

- **Potencial hídrico(Ψ):** Uno de los principales indicadores fisiológicos que indican la disponibilidad del agua es el potencial hídrico (Ψ) (Williams and Araujo, 2002), el cuál mide el estado de energía libre del agua (Grant *et al.*, 2007). El método más utilizado para conocer el potencial hídrico es mediante el uso de la cámara de Scholander o cámara de presión (Scholander, 1965).

Esta cámara mide la tensión con la que se retiene el agua en la planta y cuánto mayor sea esta tensión, a mayor estrés está sometida la planta. La figura 1 muestra una cámara de presión:



Figura 1: Cámara de Scholander o de presión para medir el potencial hídrico de la planta

La medición del potencial hídrico con la cámara de Scholander tiene la desventaja de ser un método destructivo y lento, que requiere mucho trabajo y mucho personal (Gutiérrez *et al.*, 2018a), y por ello es un método poco práctico a la hora realizar medidas en grandes superficies donde existe una variabilidad a lo largo de toda la parcela y es necesario tomar muchas medidas en diferentes zonas.

- **Conductancia estomática (g_s):** La conductancia estomática está relacionada con la apertura estomática. El estado hídrico de la planta es uno de los factores que afecta a la apertura de los estomas, ya que las plantas sometidas a estrés hídrico cierran los estomas para evitar pérdidas por transpiración y por tanto, disminuye su valor de conductancia estomática (Düring and Stoll, 1996). Para medir este parámetro se usan porómetros o medidores de intercambio de gases. La desventaja de este método es que supone un trabajo muy laborioso y difícil de automatizar (Jones, 2004).
- **Dendrometría:** Este método consiste en relacionar el estrés hídrico con las contracciones y dilataciones que se producen en el tronco de la cepa como consecuencia de la transpiración de la planta por medio del uso de dendrómetros. Cuanto mayor es el estrés hídrico, mayores son estas oscilaciones. La principal ventaja de este método es la posibilidad de automatización. Sin embargo, habitualmente su instalación es puntual, en un limitado número de cepas.
- **Flujo de savia:** El flujo de savia mide el movimiento del agua y de los solutos de manera conjunta a través de la planta debido a las diferencias de presión provocadas por la evapotranspiración en la parte aérea de la planta. Este hecho está relacionado con el estrés hídrico, ya que, a mayor estrés hídrico de la planta, menor será la evapotranspiración debido al cierre de los estomas, y por tanto menor es la velocidad del flujo de savia. Para su medición se emplean sensores que se instalan en la planta. La desventaja es que requiere demasiada instrumentación y conocimientos técnicos (Jones, 2004), y al igual que los dendrómetros, suele instalarse en un número limitado de plantas.

Todos estos métodos basados en medidas realizadas directamente sobre la planta, presentan la ventaja de que tienen en cuenta tanto el estado de humedad del suelo, el flujo de agua a través de la planta y la demanda de agua por evapotranspiración (Jones, 2004).

La mayor parte de los métodos descritos anteriormente son laboriosos, y difíciles de automatizar, por eso es necesario desarrollar nuevos métodos que faciliten un conocimiento del estado hídrico del viñedo con un mayor número de datos, de manera más rápida, y que faciliten la visualización de la variabilidad del estado hídrico del cultivo a lo largo de todo el viñedo.

1.3. LA TERMOGRAFÍA

En viticultura de precisión son necesarios nuevos métodos que permitan conocer la cantidad de agua de un viñedo de manera rápida y eficaz. Por eso se están desarrollando otros métodos para poder realizar estudios acerca de la variabilidad del potencial hídrico en un viñedo. Uno de estos métodos es el uso de la termografía, que establece una relación entre el cierre y la apertura de los estomas con la temperatura de la superficie de la hoja (Sousa *et al.*, 2002) y permite visualizar estas diferencias de temperatura en las hojas gracias a la emisión de radiación infrarroja. Son varios estudios los que han comprobado que cuando la cantidad de agua disponible es baja, los estomas se cierran, disminuyendo la transpiración y produciendo un aumento de temperatura en la superficie de la hoja, debido a la falta de disipación de calor, mientras que si la cantidad de agua disponible es suficiente, los estomas permanecen abiertos y disminuye esa temperatura. Esto permite poder establecer una correlación entre la temperatura y el potencial hídrico de la planta (Gutiérrez *et al.*, 2018a).

La termografía presenta muchas ventajas con respecto a la cámara de Scholander y de otros métodos más clásicos, ya que se trata de un método no destructivo, más rápido, más automatizable y capaz de proporcionar información sobre la variabilidad del potencial hídrico en un viñedo (Gutiérrez *et al.*, 2018a).

Un aspecto a tener en cuenta en relación a la termografía es que la temperatura de la superficie de las hojas puede estar muy influenciada por las condiciones meteorológicas, como por ejemplo el viento. Para mitigar el impacto de estos factores ambientales se han desarrollado varios índices como el “Crop Water Stress Index” (CWSI) (Idso, 1982), y el índice de la conductancia estomática (lg) (Jones, 2013). Para su cálculo es necesario usar dos temperaturas de referencia, la temperatura de máxima evapotranspiración (T_{wet}) y la temperatura a la cual los estomas están cerrados totalmente (T_{dry}). Estos parámetros ayudan a disminuir la influencia que pueden tener las condiciones ambientales sobre la temperatura de la hoja.

El cálculo de dichos índices se lleva a cabo mediante las ecuaciones indicadas a continuación:

$$CWSI = \frac{T_c - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$$

$$lg = \frac{T_{dry} - T_c}{T_c - T_{wet}}$$

Para la medición de las temperaturas de referencia, en el caso de la T_{dry} puede utilizarse una hoja con vaselina, para evitar la transpiración y simular el cierre total de los estomas, mientras que para la obtención de T_{wet} es necesaria una hoja humedecida con agua, para simular la máxima hidratación, (Grant *et al.*, 2016). Sin embargo, existen estudios en los que en lugar de obtener estas temperaturas de referencia de esta manera, se eligen como referencia la temperatura máxima y mínima de la vegetación, lo que facilita y automatiza el proceso de medida (Gutiérrez *et al.*, 2018b)

1.4. CÁMARAS Y SENSORES TÉRMICOS

Existen nuevos avances tecnológicos que permiten medir las respuestas térmicas de una planta a las variaciones de agua.

Las cámaras térmicas son utilizadas como dispositivos portátiles para la estimación del potencial hídrico de un viñedo y ayudan a establecer un riego adecuado (Jones and Leinonen, 2003). Son cámaras capaces de detectar la radiación infrarroja que emiten los objetos y dan lugar a imágenes térmicas en las que se muestra la radiación calorífica de los objetos. El campo espectral que cubre la termografía es de 8 a 13 μm . Las cámaras tienen un sensor térmico que al recibir la radiación infrarroja se calienta y permite calcular la temperatura a la que se encuentran esos objetos y asignar un color a cada temperatura para conseguir una imagen coloreada.

También hay sensores térmicos llamados radiómetros de infrarrojos, que funcionan de una manera similar a las cámaras térmicas. Los sensores infrarrojos convierten la energía térmica de los objetos en una señal eléctrica que permite calcular la temperatura de la zona de estudio del sensor, pero a diferencia de la cámara no proporciona imágenes térmicas, sino un valor de temperatura. La imagen que tome el sensor depende de la distancia a la que se tome, ya que en función de ella varía el diámetro de la región medida. Por tanto, uno de los problemas que pueden aparecer con el uso de estos sensores térmicos se debe a la aparición de huecos en la vegetación, que pueden alterar la temperatura media obtenida por el sensor.

En la figura 2 se puede observar tanto una cámara térmica (figura 2 A) como un radiómetro de infrarrojo (Figura 2 B).

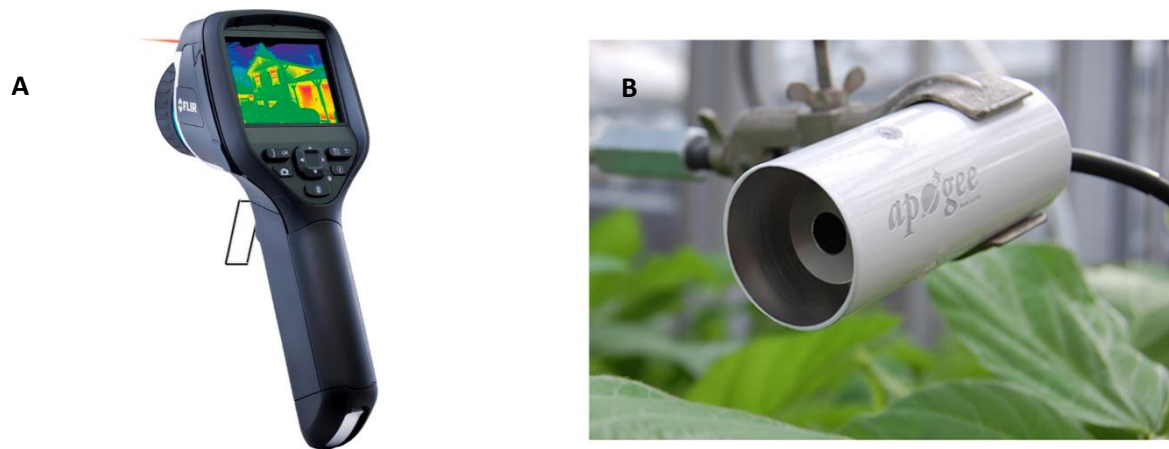


Figura 2: Instrumentos empleados en termografía. A) Cámara térmica B) Radiómetro infrarrojo

2. OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo fue la evaluación de un método no invasivo que permita conocer la variabilidad del estado hídrico de la vid de una manera rápida, no destructiva y de bajo coste, basada en la termografía.

Para ello se establecieron dos objetivos específicos:

- La validación de un nuevo sensor termográfico de bajo coste, siguiendo tres fases:
 1. Calibración
 2. Validación interna
 3. Validación externa.

Mediante la comparación de las medidas de potencial hídrico (Ψ) de un viñedo empleando la cámara de Scholander, y las obtenidas empleando el sensor termográfico.

- Evaluar la influencia de condiciones como la porosidad de la vegetación o la influencia de filas adyacentes a la hora de tomar los datos empleando el sensor radiométrico de infrarrojos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

La parte experimental y toma de medidas se llevó a cabo en el verano de 2018 en dos viñedos diferentes.

VIÑEDO EXPERIMENTAL I

Las primeras medidas se tomaron durante cuatro semanas de 2018, en los meses de Junio, Julio y Agosto en un viñedo comercial situado en Tudelilla, La Rioja, España (Lat. 42° 18' 18.26", Long. -2° 7' 14.15", Alt. 515 m). Es un viñedo plantado con la variedad Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Las cepas fueron plantadas en 2002. Tiene un sistema de conducción en espaldera. El viñedo tiene una orientación Norte-Sur, y un marco de plantación de 2.60 × 1.20 metros. En esta zona el clima es mediterráneo y semiárido, con veranos muy cálidos y de escasas precipitaciones.

Para el desarrollo del experimento se llevó a cabo un diseño experimental aleatorio y en bloques, con tres regímenes de riego diferentes.

Los tratamientos de riego fueron:

- T0: Máximo riego. Dos tuberías de agua paralelas que proporcionan 6L/h de agua.
- T1: Riego moderado. Una tubería de agua proporciona 3L/h.
- T2: Sin riego. Las plantas no fueron regadas durante el experimento.

El riego estaba programado para aplicarse dos veces al día durante 5 días a la semana. Además, de cada tratamiento se hicieron 4 repeticiones distribuidas de manera aleatoria en tres filas del viñedo separadas entre ellas por la misma distancia.

En la figura 3 se muestra la distribución de los tratamientos de riego en el viñedo de Tudelilla:

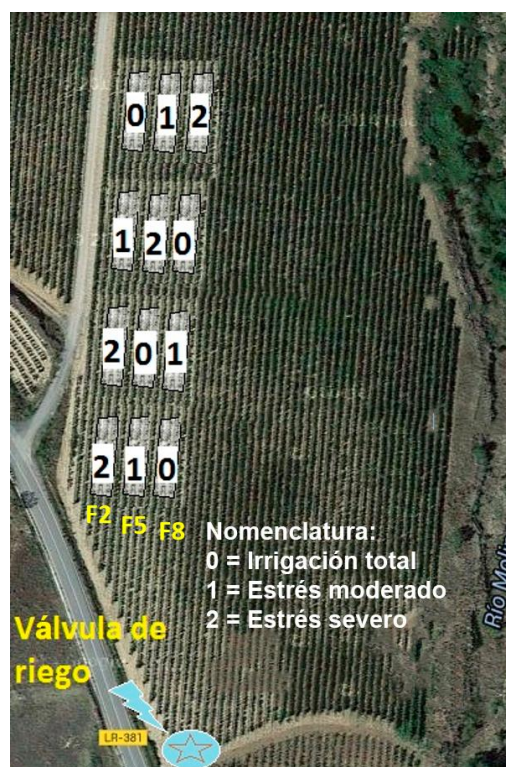


Figura 3: Diseño experimental en Tudelilla, La Rioja, Junio, Julio y Agosto de 2018. Distribución de los diferentes tratamientos de irrigación en el viñedo de Tudelilla.

Cada tratamiento afectaba a 25 cepas. De esas 25 cepas cada 5 estaban entre dos postes contiguos o lo que es lo mismo, distribuidas en 5 foros con 5 plantas cada uno, de los cuales el primer y último foro se descartaron a la hora de tomar medidas para evitar el efecto borde. Las medidas se tomaron en los 3 foros centrales, y en cada uno se descartaron también la primera y la última planta, por lo que solo se tomó una medida de cada una de las tres plantas centrales.

VIÑEDO EXPERIMENTAL II

El segundo viñedo experimental estaba localizado en una parcela comercial en Quinta do Ataíde, Junqueira, Portugal (Lat. 41° 14' 41.1 ", Long. 7° 0.6' 52.9", Alt.151 m). Las medidas se tomaron durante Julio de 2018. La variedad del viñedo en el que se tomaron las medidas fue Touriga Nacional. Las cepas de este viñedo fueron plantadas en 2014. La orientación del viñedo es este/oeste. El viñedo tiene un sistema de conducción en espaldera, con un marco de plantación de 2.5 × 1.2 m. El clima de esta zona es cálido y seco. Para llevar a cabo el experimento, se seleccionaron 5 filas con tres áreas diferentes de vigor de acuerdo a los valores de NDVI tomados con un vuelo comercial con dron en la semana anterior. La figura 4 muestra las diferentes zonas de vigor:

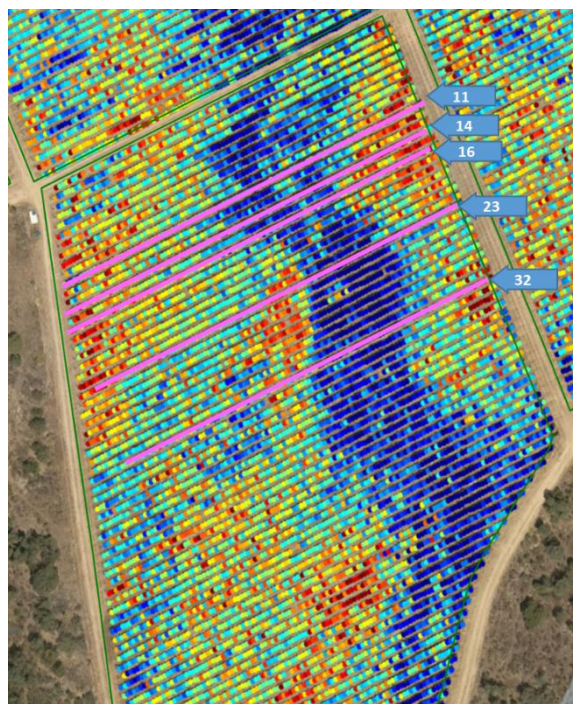


Figura 4: *Diseño experimental con tres áreas de vigor en Quinta do Ataíde, Junqueira, Julio de 2018. Los colores azules representan valores de alto vigor mientras los amarillos a rojos valores de bajo vigor.*

Cada una de las filas donde se tomaron las medidas estaba formada por 21 bloques de 5 cepas cada uno, pero solo se tomaron medidas de 10 de esos bloques. Además, cada uno de los bloques estaba formado por 5 plantas, de las cuales solo las tres centrales se eligieron para la toma de medidas.

3.2. ADQUISICIÓN DE LAS MEDIDAS DE TEMPERATURA

En ambos viñedos se empleó un sensor térmico para la adquisición de la temperatura de la vegetación. Se trata de un sensor radiométrico infrarrojo SI-421 (Apogee instrument Inc., Utah, EE. UU.)

Este sensor se muestra en la Figura 5:

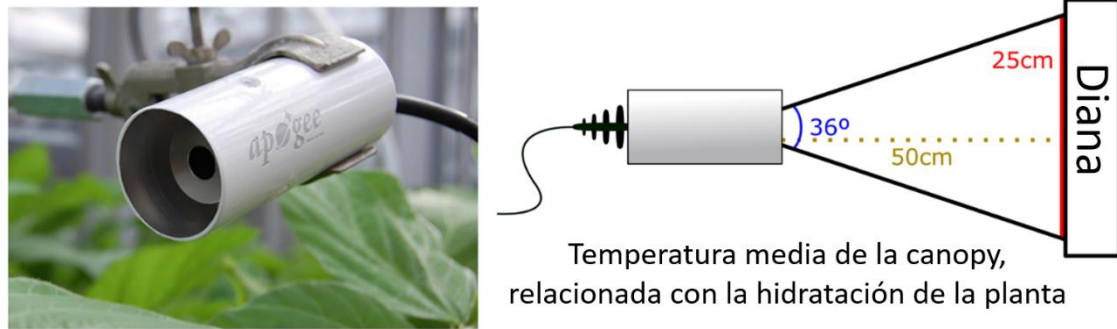


Figura 5: Sensor térmico empleado para monitorizar las medidas del estado hídrico de un viñedo

Este sensor es elegido por su robustez, y por la relación fisiológica que existe entre el estado hídrico y la temperatura de la planta.

VIÑEDO EXPERIMENTAL I

En el caso de Tudelilla la adquisición de las medidas de temperatura se realizó durante los meses de Junio, Julio y Agosto. Las medidas se tomaron en la cara este, entre las 14:00-15:00 horas. Para ello el sensor se situó sobre un vehículo móvil, un quad, que iba a una velocidad aproximada de 5km/h, y a una altura de 1.08 m y unido a un ordenador. Las medidas se tomaron en continuo, con una frecuencia de una medida por segundo (1Hz) y a una distancia aproximada de la vegetación de 1.2 m. En la figura 6 se muestra el sensor térmico montado sobre el quad.



Figura 6: Sensor térmico Apogee montado sobre un quad en Tudelilla, La Rioja (España)

VIÑEDO EXPERIMENTAL II

En el caso de Portugal la adquisición de las medidas se realizó en Julio de 2018. Las medidas se tomaron por la mañana (10:00 h) y en la cara sur del viñedo. En este caso el sensor térmico iba montado sobre un robot que se movía a una velocidad aproximada de 1.5 km/hora, a una distancia de la vegetación de 50 cm, y colocado a una altura de 1.08 m del suelo. En la figura 7 se observa el sensor instalado en el robot:

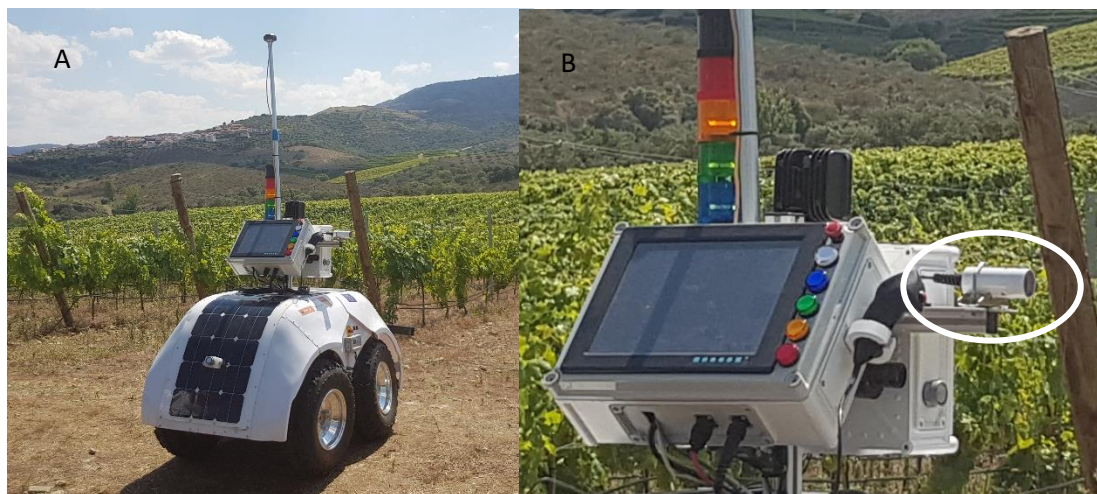


Figura 7: Sensor radiométrico de IR A) montado sobre un robot B) Zoom del sensor radiométrico, en Quinta do Ataíde, Junqueira (Portugal)

3.3. MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO

El método de referencia utilizado para la validación del sensor fue el potencial hídrico (Ψ) medido con la cámara de Scholander (modelo 600, PMS, Instrument Company, USA).

VIÑEDO EXPERIMENTAL I

En Tudelilla se midió el potencial hídrico xilemático a mediodía (Ψ_x), sobre las 13:00 horas. Para ello se seleccionaban las hojas adultas de la zona media-alta de los pámpanos que iban a medirse. En este caso en cada fila había 4 tratamientos de riego y cada uno de ellos tenía 5 foros de 3 plantas cada foro, los foros de los extremos se eliminaron y se eligió la planta central de los otros tres, seleccionando un total de 12 hojas en cada fila. Las hojas de cada una de estas plantas se cubrían en primer lugar con film de plástico, y en segundo lugar con papel de aluminio, y se dejaban así durante una hora para conseguir evitar la fotosíntesis y el intercambio gaseoso logrando así un equilibrio del potencial de la hoja con el resto de la planta. Una vez transcurrido ese tiempo, se comenzaron a hacer las medidas con la cámara de Scholander, para ello se iban cogiendo las hojas seleccionadas anteriormente y midiendo su potencial.

VIÑEDO EXPERIMENTAL II

En el caso de Portugal, se tomaron medidas de potencial hídrico de la hoja (Ψ_l) en la cara sur. A diferencia del viñedo experimental I, para la determinación del potencial hídrico de la hoja, no fue necesario una aclimatación previa de la misma. Las medidas fueron tomadas durante la mañana, sobre las 10:00 horas, ya que al ser una zona tan cálida si se tomaban a medio día los estomas estarían totalmente cerrados, y no se obtendrían buenos resultados. Para tomar las medidas de cada fila de 21 bloques se eligieron 10 bloques de 5 plantas cada uno, y de esas 5

plantas se tomaron medidas de las tres centrales, es decir, se midieron unas 30 plantas para cada fila.

3.4. INFLUENCIA DE LA POROSIDAD Y LAS FILAS ADYACENTES

Además de las medidas tomadas en los viñedos experimentales de Tudelilla y de Portugal, también se realizó un estudio para comprobar la influencia que tienen tanto la porosidad, es decir, la densidad de huecos en la vegetación de la espaldera, como la influencia de filas adyacentes sobre las temperaturas que se obtienen empleando un sensor radiométrico de infrarrojo.

Este estudio se llevó a cabo en Logroño, en el viñedo del campo de prácticas de Corazonistas que pertenece a la Universidad de La Rioja.

Para ello se realizaron medidas en estático de 10 plantas, 5 de ellas con una fila adyacente y las otras 5 sin fila adyacente, y con diferentes niveles de porosidad de la vegetación. Los niveles de porosidad que se tomaron fueron:

- Nivel 1: Porosidad 0%
- Nivel 2: Porosidad 25 %
- Nivel 3: Porosidad 50 %
- Nivel 4: Porosidad 75 %
- Nivel 5: Porosidad 100 %

La figura 8 muestra algunos de los diferentes niveles de porosidad que se emplearon para ver cómo influyen en la toma de medidas con el sensor radiométrico. El área circular muestra el campo de visión del sensor radiométrico. La sección de medida se hizo con un alambre de 30 cm de diámetro, que simula la región de interés o área de medida que cubre el sensor radiométrico instalado a 50 cm de la espaldera y a 1.08 m sobre el suelo.

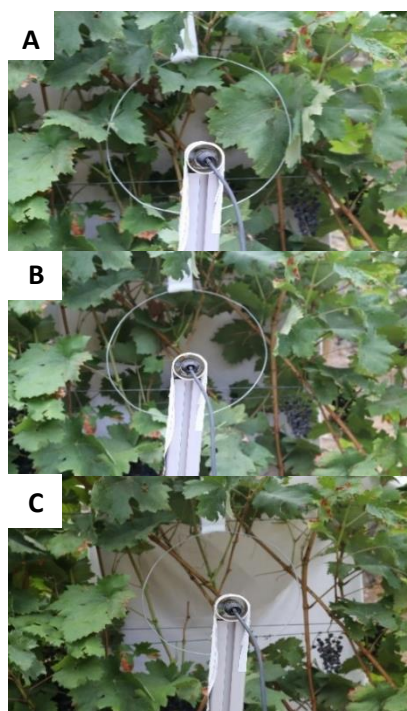


Figura 8: Diferentes niveles de porosidad para el estudio de la influencia de factores ambientales A) Porosidad del 25% B) Porosidad del 50% C) Porosidad del 100%

Las regiones de interés (circunferencia en las imágenes de la Figura 8) fueron deshojadas de forma gradual para recoger los distintos niveles de porosidad. Posteriormente en cada uno de estos niveles se ha tomado una foto RGB para posteriormente sacar el % de píxeles de hoja y de hueco.

Para la toma de las medidas de temperatura se empleó el sensor térmico apogee, teniendo en cuenta la distancia entre el sensor y la vegetación. La región de medida se hizo con un alambre de 30 cm de diámetro.

Las condiciones de luz durante la toma de las medidas fueron muy cambiantes. Durante las mediciones en las primeras 5 plantas con fila adyacente, el cielo estaba muy nublado y las condiciones de luz y de temperatura fueron bajas. Sin embargo, en las medidas de las otras 5 plantas que corresponden a la fila externa, la iluminación y la temperatura fueron cambiando, estando en la mayoría de los casos las hojas iluminadas por el sol.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para estudiar la relación existente entre las medidas de temperatura obtenidas con el sensor y el potencial hídrico medido con la cámara de presión se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson (r) empleando Excel, versión 1902 (Office 365, España)

También se ha realizado análisis de varianza (ANOVA) en el caso del viñedo experimental I, para estudiar si existen diferencias significativas dependiendo de los tratamientos de riego. Para ello se ha hecho un análisis de varianza para los potenciales hídrico de xilema y para las temperaturas de la vegetación con las medidas que se obtuvieron durante los meses de junio, julio y agosto en el viñedo de Tudelilla. Además del análisis de varianza, también se ha hecho una comparación de medias con el test SNK (Student-Newman-Keuls). Para el tratamiento estadístico de los datos se empleó el software InfoStat, versión 2008 (Grupo Infostat, Argentina).

Finalmente, se realizó un estudio sobre la correlación existente entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander, y el potencial hídrico esperado mediante el uso del sensor apogee. Para ello se realizó un análisis de correlación multivariante empleando el software The Unscrambler (CAMO ASA, Noruega).

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. VALIDACIÓN DE SENSORES RADIOMÉTRICOS DE INFRARROJO PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL HÍDRICO:

Tras el tratamiento de los datos obtenidos en los dos viñedos experimentales, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

VIÑEDO EXPERIMENTAL I:

Una vez tomadas todas las medidas en el viñedo experimental I situado en Tudelilla, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para estudiar si existían diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de riego (T_0 , T_1 , T_2), tanto en el caso del potencial hídrico xilemático (Ψ_x) como en el caso de la temperatura de la vegetación. Este análisis de varianza se realizó por separado para cada uno de los días. Además, se realizó un análisis comparativo de las medias, para el caso del potencial xilemático y de la temperatura de la vegetación, que permitió comprobar si existían diferencias significativas entre ellas. Los resultados obtenidos en este caso se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1: Datos promedio en los diferentes días de medición para la t^a del aire, la humedad relativa, la t^a de vegetación y el potencial xilemático en función de los diferentes tratamientos de riego (T_2 sin riego, T_1 riego moderado, T_0 riego total), medidos en el medio día solar, entre las 14:00 y las 15:00 horas. $N=12$. A y B muestran las diferencias significativas entre las medias, y n.s (no hay diferencias significativas), *($p<0.001$), **($p<0.05$) muestran los valores de significación obtenidos por medio de un análisis de varianza ANOVA.

FECHAS		26/06/2018	5/07/2018	12/07/2018	2/08/2018
Tª AIRE(°C)		31.2	23.7	26.0	33.4
HUMEDAD RELATIVA (%)		24	43	47	35
Tª MEDIA VEGETACIÓN (°C)	T_0	30.22 A	24.70 A	26.83 A	31.46 A
	T_1	30.53 A	30.53 B	27.35 A	32.18 B
	T_2	30.18 A	25.04 A	26.71 A	32.35 B
		n.s.	*	n.s.	**
Ψ_x MEDIO (MPa)	T_0	-0.88 A	-0.90 A	- 1.06 A	- 1.33 A
	T_1	-0.93 A	- 0.93 A	- 1.13 A	- 1.40 A
	T_2	-0.93 A	- 0.97 A	- 1.12 A	- 1.44 A
		n.s.	n.s.	n.s.	n.s

En la Tabla 1, se puede observar que los valores de potencial xilemático a lo largo de todas las fechas de medida variaban de -0.88 MPa hasta -1.44 MPa. Las medidas de potencial que fueron tomadas durante esas 4 fechas mostraron que para tratamientos de estrés hídrico severo (T_2), los valores de potencial eran más negativos que en el caso de estrés hídrico moderado (T_1) o de irrigación total (T_0), sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ellos, ni tampoco entre sus medias para ninguna de las fechas en las que se tomaron las medidas, esto puede deberse a las abundantes lluvias que se dieron durante el verano de 2018, sobretudo en Julio, que compensó los distintos regímenes de riego y las posibles diferencias que se habrían causado. Además, los potenciales hídricos en general fueron más negativos a medida que iba avanzando el verano, es decir, cada vez el estrés hídrico era más severo.

En cuanto a las temperaturas de la vegetación que se muestran en la Tabla 1, solo se encontraron diferencias significativas en dos fechas: el 5 de Julio de 2018, se encontraron diferencias significativas entre las temperaturas según los diferentes tratamientos de riego, y la media de temperatura para estrés hídrico severo (T_2) y para irrigación total (T_0) fueron significativamente menores que la media de la temperatura para un estrés hídrico moderado

(T_1). En el caso de las medidas de temperatura de la vegetación que se obtuvieron el 2 de Agosto de 2018, también existían diferencias significativas según los diferentes tratamientos de riego, y además, las medias de temperatura en el caso de un estrés hídrico severo (T_2) y del estrés hídrico moderado (T_1), fueron significativamente mayores que en el caso de la irrigación total (T_0). En esta fecha, debería haberse visto en el potencial una tendencia acorde con la temperatura, encontrando también diferencias significativas en el potencial, pero esto no se observó.

También se estudió la correlación existente entre el potencial hídrico de xilema, con la temperatura de la vegetación y con los diferentes índices térmicos obtenidos a partir de la temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura del aire, en las diferentes fechas. Los valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el potencial hídrico xilemático Ψ_x (MPa) y los diferentes índices térmicos (T vegetación, CWSI, IG, T^a vegetación – T^a aire) para $N=36$

N=36				
	26/06/2018	5/07/2018	12/07/2018	2/08/2018
	r	r	r	r
Ψ_x (MPa) vs T^a vegetación ($^{\circ}$ C)	0.108	0.343	0.6123	0.541
Ψ_x (MPa) vs CWSI	0.155	0.343	0.6123	0.541
Ψ_x (MPa) vs IG	0.180	0.072	0.2831	0.368
Ψ_x (MPa) vs T^a vegetación- T^a aire ($^{\circ}$ C)	0.155	0.343	0.6123	0.541

La Figuras 9, 10, 11 y 12 muestra las diferentes gráficas obtenidas para la correlación entre el potencial hídrico de xilema y los diferentes índices térmicos en las diferentes fechas.

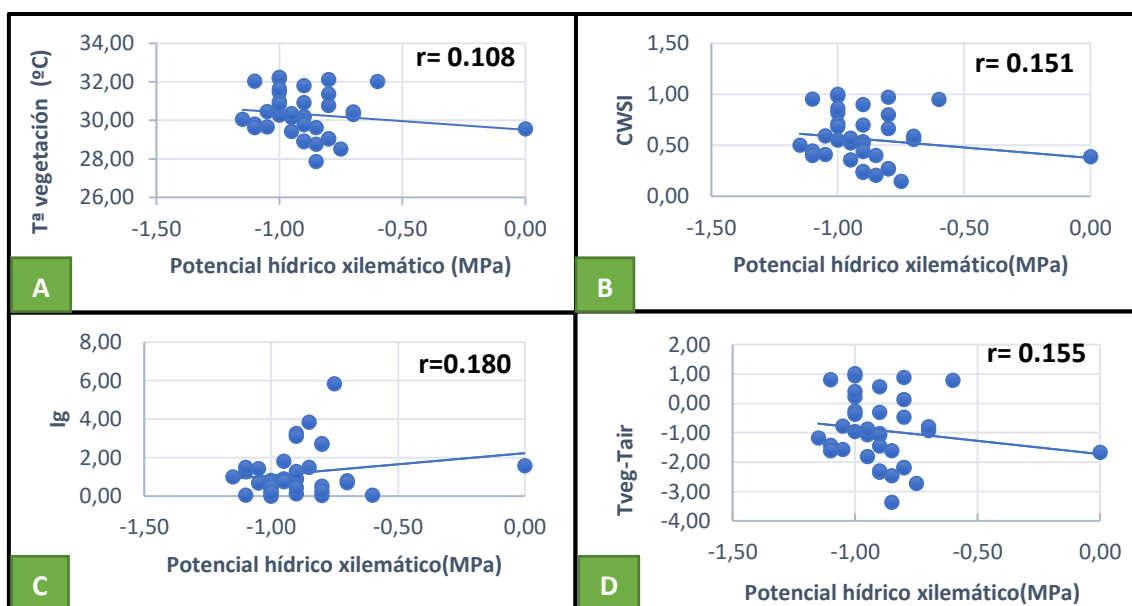


Figura 9: Correlación entre el potencial hídrico de xilema con A) temperatura de la vegetación($^{\circ}$ C), B) CWSI, C) IG, D) Temperatura de la vegetación menos temperatura del aire($^{\circ}$ C). (26/06/2018)

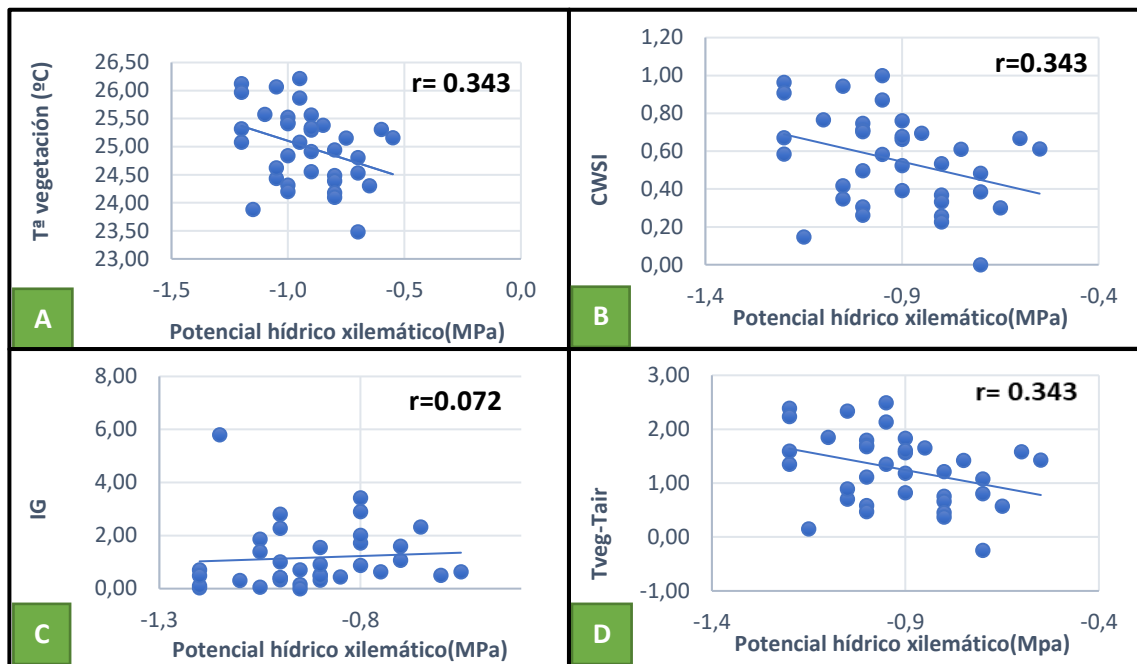


Figura 10: Correlación entre el potencial hídrico de xilema con A) temperatura de la vegetación(°C), B) CWSI, C) Ig, D) Temperatura de la vegetación menos temperatura del aire(°C). (5/07/2018)

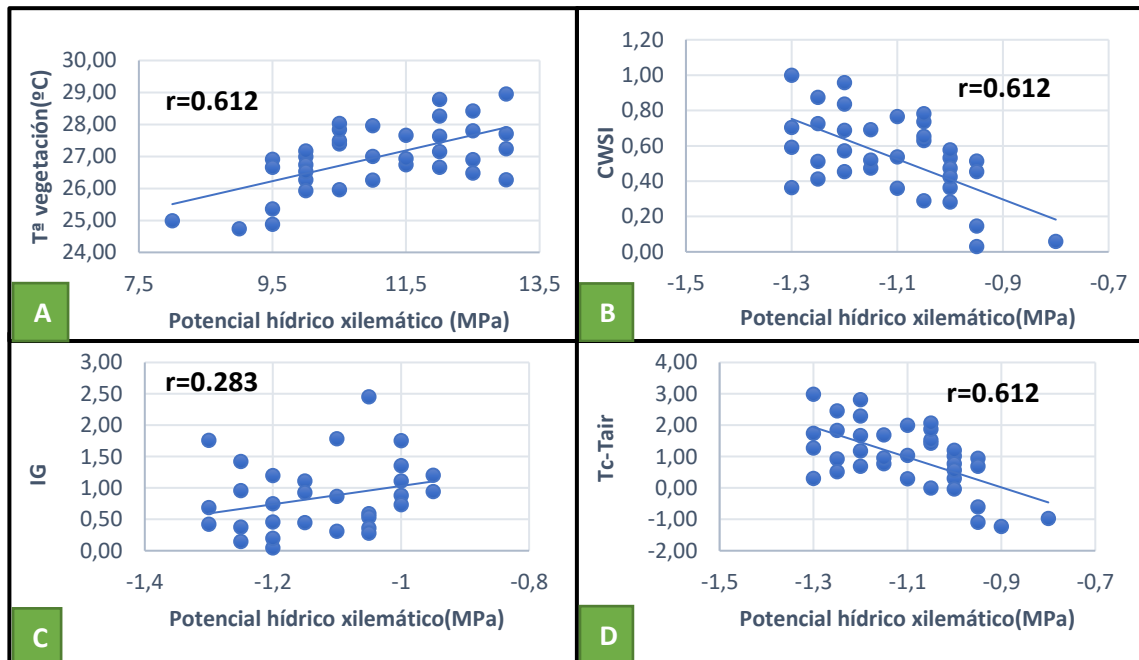


Figura 11: Correlación entre el potencial hídrico de xilema con A) temperatura de la vegetación(°C), B) CWSI, C) Ig, D) Temperatura de la vegetación menos temperatura del aire(°C). (12/07/2018)

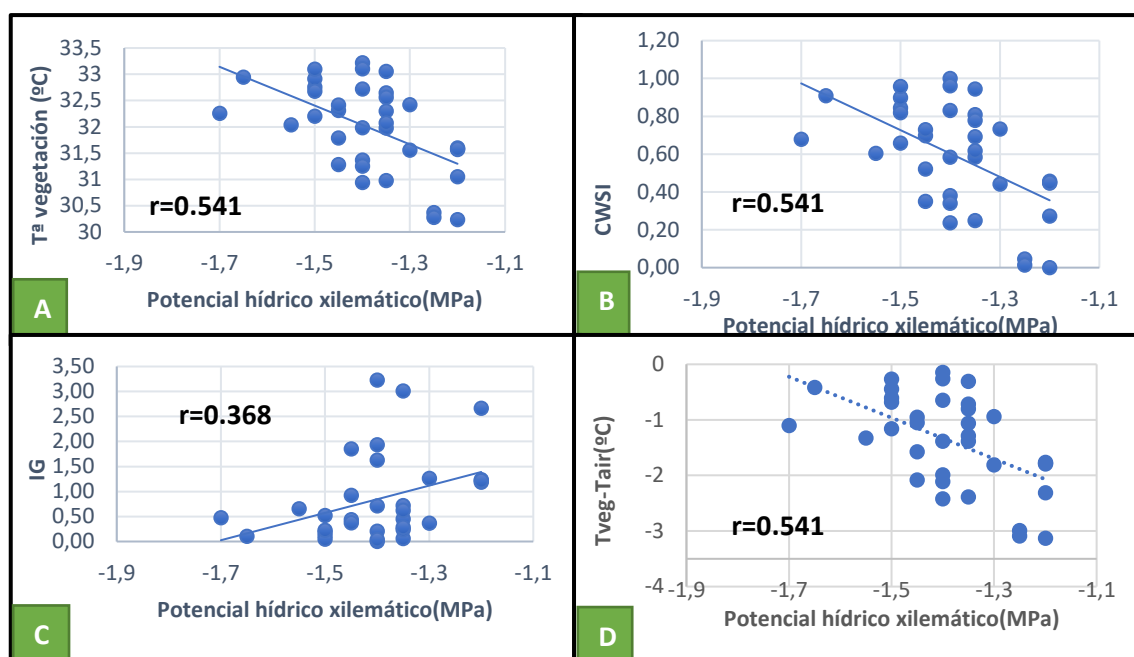


Figura 12: Correlación entre el potencial hídrico de xilema con A) temperatura de la vegetación(°C), B) CWSI, C) Ig, D) Temperatura de la vegetación menos temperatura del aire(°C) (2/08/2018)

Tanto las Figuras 9,10,11 y 12, como la Tabla 2, mostraron que los coeficientes de correlación de Pearson (r) son en general bajos, es decir, no existe una buena correlación entre el potencial hídrico y la temperatura de la vegetación. Si bien, el valor de r aumenta a medida que se ampliaron las diferencias entre los distintos regímenes hídricos. Además, se comprobó que los índices térmicos (CWSI, Ig, T. vegetación-T. aire), no mejoraron la correlación.

Debido a las bajas correlaciones que se obtuvieron, se decidió realizar un análisis multivariante, en el que se tuvieron en cuenta otras variables externas que podían influir en los resultados y en los distintos índices. Las diferentes variables que se tuvieron en cuenta fueron 7:

1. Temperatura de la vegetación (° C)
2. Temperatura del cuerpo del sensor o temperatura de referencia estándar (° C)
3. Índice térmico CWSI
4. Índice térmico Ig
5. Temperatura de la vegetación – Temperatura del aire (° C)
6. T aire (° C)
7. Humedad relativa (%)

Así, se realizó una correlación multivariante, en la que teniendo en cuenta las 7 variables, se estudió la correlación entre el potencial hídrico predicho, frente al potencial hídrico calculado. Para ello, se realizó una validación interna (validación cruzada), y una validación externa (predicción) del método para las 4 fechas de medida.

Solo se representaron los datos obtenidos por validación cruzada ya que se consideró que son más representativos y se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 13:

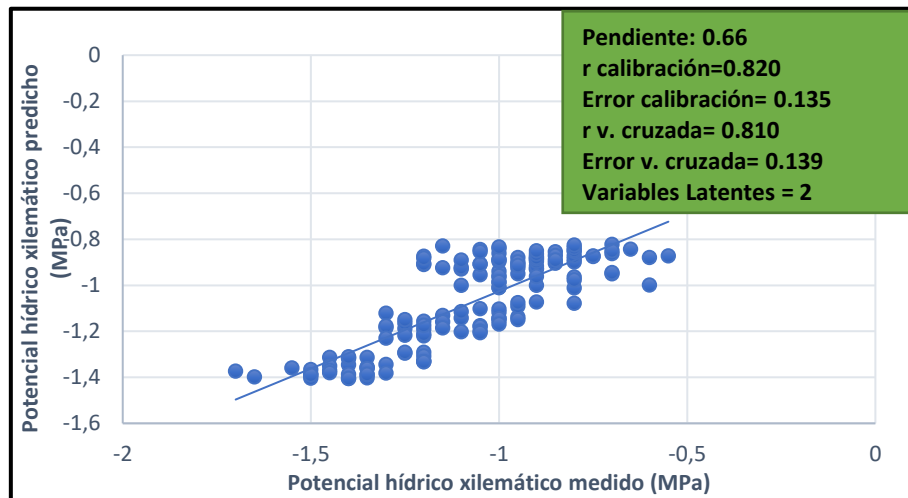


Figura 13: Análisis multivariante de 7 variables (T^a vegetación, T^a cuerpo, CWSI, Ig, T^a aire, T^a vegetación- T^a aire, humedad relativa)

Al ver que los resultados mejoraban considerablemente, se intentó simplificar el modelo reduciendo el número de variables, para ello se hicieron todas las combinaciones posibles hasta conseguir mejorar los resultados. El primer resultado que se obtuvo con un número de variables menor y que mejoraba la correlación de Pearson fue con 5 variables.

Las variables empleadas en este caso fueron:

1. T^a vegetación ($^{\circ}$ C)
2. Índice térmico CWSI
3. T^a vegetación – T^a aire ($^{\circ}$ C)
4. T^a aire
5. Humedad relativa (%)

Los resultados obtenidos en el análisis multivariante en el que se tuvieron en cuenta las 5 variables anteriores se muestra en la figura 14:

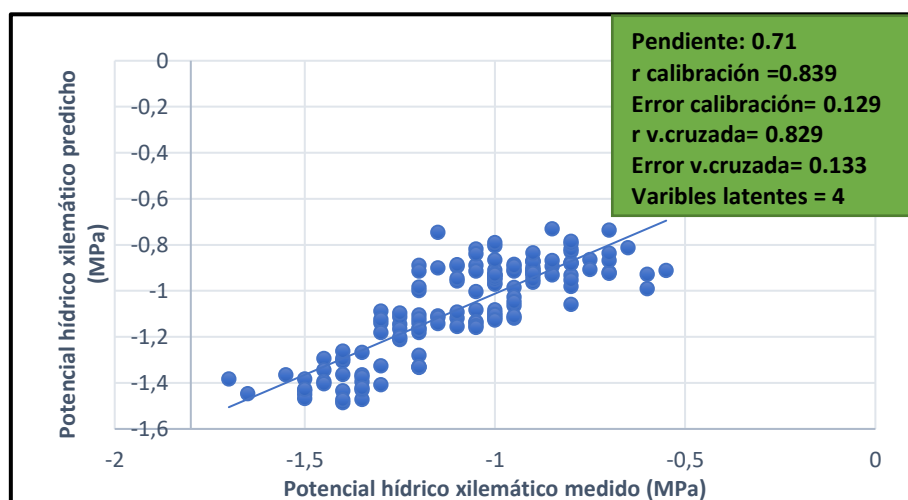


Figura 14: Análisis multivariante de 5 variables (T^a vegetación, CWSI, T^a vegetación-, T^a aire, T^a , T^a aire, humedad relativa)

En este caso los coeficientes de correlación de Pearson tanto en calibración ($r=0.839$) como en validación cruzada ($r=0.829$), mejoraron respecto al análisis con 7 variables. Pero no todas las variables influyen de la misma manera, y eligiendo las que más importancia tienen se consiguió simplificar el modelo, obteniendo mejores resultados.

Se siguieron haciendo distintas combinaciones entre variables intentado reducir el número de estas en busca de coeficientes de correlación (r) más altos. Se consiguió mejorar teniendo en cuenta solo 3 variables. Estas 3 variables fueron:

1. T^a vegetación ($^{\circ}\text{C}$)
2. T^a aire ($^{\circ}\text{C}$)
3. Humedad relativa (%)

Con estas tres variables se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 15:

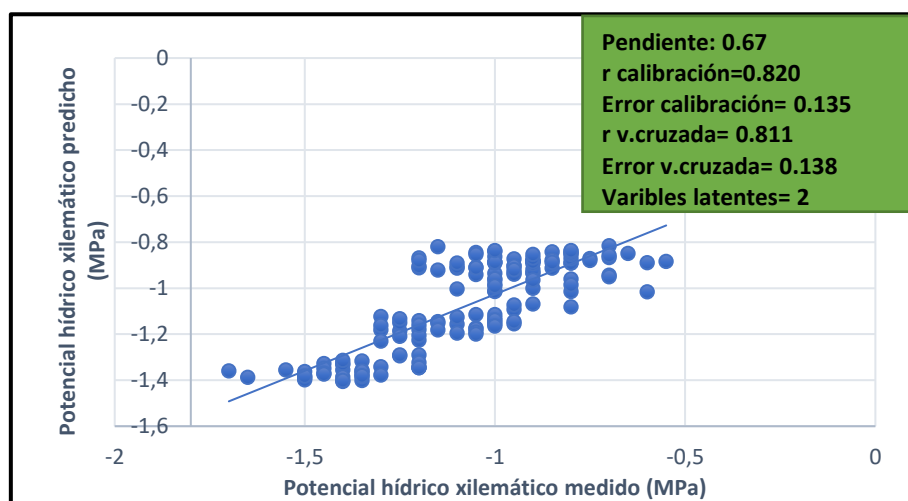


Figura 15: Análisis multivariante de 3 variables (T^a vegetación, T^a aire, humedad relativa)

Los valores de correlación obtenidos en este caso para calibración ($r=0.820$) y para validación cruzada ($r=0.811$) fueron similares a los de la figura 13. Lo mismo ocurre con la pendiente y el error, pero en este caso se consiguió reducir el número de variables a 3, es decir, el método se simplificó considerablemente.

Por tanto, se observó que las variables con mayor importancia son la temperatura de la vegetación medida con el sensor de infrarrojo en continuo, la temperatura del aire y la humedad relativa. Teniendo cuenta esas variables se consiguieron mejores resultados a la hora de predecir el potencial hídrico de xilema con el sensor radiométrico. Además, en este caso los datos de la temperatura del aire y de la humedad relativa se obtuvieron como las medias de temperatura y de humedad relativa a esa hora tomadas de la estación meteorológica más cercana situada en Ausejo, por lo que es probable que si se hubiesen instalado en el sensor instrumentos capaces de medir la humedad relativa y la temperatura del aire de esa zona en el mismo momento que se toman las medidas mejorarían notablemente los resultados.

VIÑEDO EXPERIMENTAL II:

En el caso del viñedo experimental II situado en Portugal, no se tuvieron en cuenta diferentes tratamientos de riego cuando se tomaron las medidas y por tanto no se realizó ningún análisis de varianza ANOVA como en el caso del viñedo experimental I situado en Tudelilla.

Se estudiaron la correlación existente entre el potencial hídrico medido por la mañana (10:00), con la T^a de la vegetación obtenida con el sensor radiométrico, y con los índices térmicos CWSI, Ig y T^a vegetación – T^a aire, pero en este caso solo se tomaron medidas un día, el 19 de Julio de 2018.

Los datos de correlación de Pearson se muestran en la tabla 3, y las rectas se representan en la figura 16:

Tabla 3: Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el potencial hídrico de la hoja (Ψ) y los diferentes índices térmicos (T vegetación, CWSI, Ig, T^a vegetación – T^a aire) $N= 50$

N=36	
	19/07/2018
	r
Ψ_x (MPa) vs T^a vegetación ($^{\circ}$ C)	0.187
Ψ_x (MPa) vs CWSI	0.214
Ψ_x (MPa) vs Ig	0.121
Ψ_x (MPa) vs T^a vegetación- T^a aire ($^{\circ}$ C)	0.344

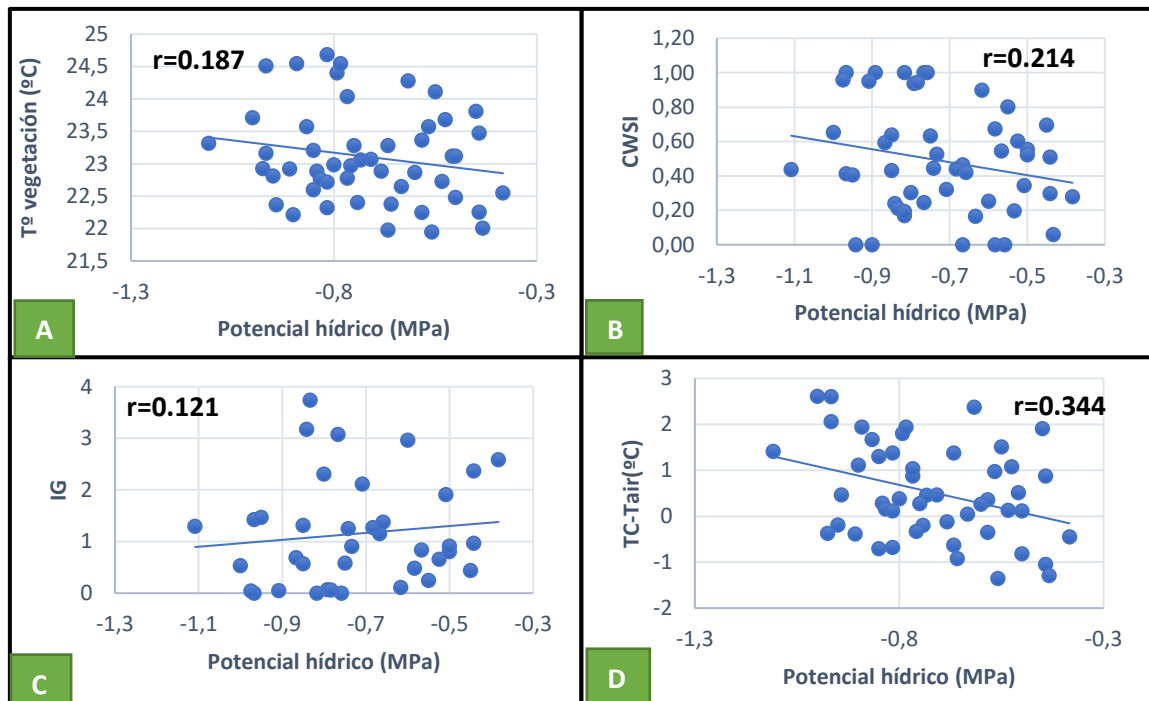


Figura 16: Correlación entre el potencial hídrico de la hoja con A) temperatura de la vegetación($^{\circ}$ C), B) CWSI, C) Ig, D) Temperatura de la vegetación menos temperatura del aire($^{\circ}$ C) (19/07/2018)

Los coeficientes de correlación de Pearson en todos los casos eran muy bajos, es decir no existían buenas correlaciones lineales entre el potencial hídrico de la hoja y la temperatura de la vegetación, así como con sus distintos índices térmicos, y por tanto fue necesario mejorar el modelo. Además, al igual que en Tudelilla, en Portugal también había llovido mucho las semanas anteriores.

Para mejorar los resultados y obtener una buena predicción entre el potencial hídrico medido y el calculado, se realizó un análisis multivariante, en el que se tuvieron en cuenta muchos factores externos. En este caso se tuvieron en cuenta 8 variables durante el análisis, para predecir así el potencial hídrico.

1. T^a vegetación
2. Mediana de la temperatura de vegetación
3. Desviación estándar de la temperatura de vegetación
4. Índice térmico CWSI
5. Índice térmico IG
6. T^a vegetación – T^a aire
7. T^a aire
8. Humedad relativa

Teniendo en cuenta estas 8 variables se realizó el análisis multivariante para obtener la correlación entre el potencial hídrico medido por la mañana y el potencial hídrico predicho. El resultado obtenido se muestra en la Figura 17:

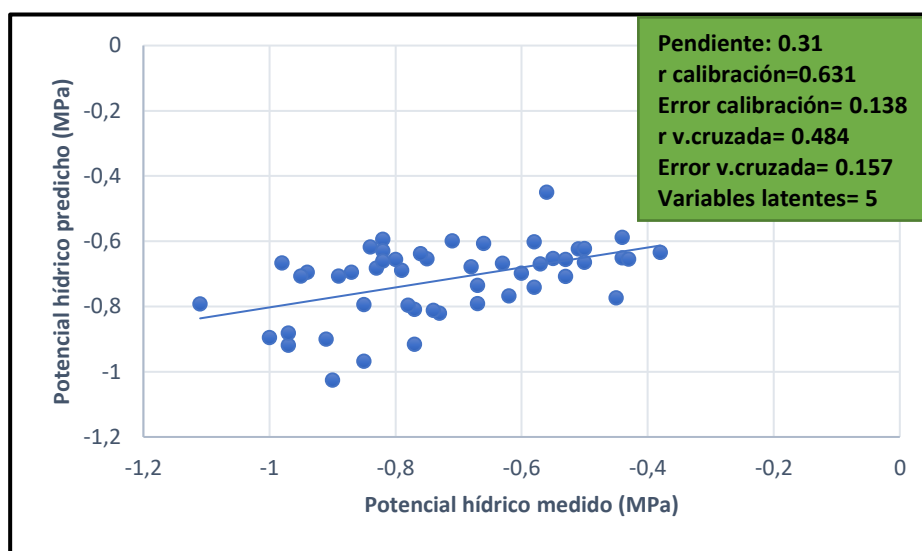


Figura 17: Análisis multivariante de 8 variables (T^a vegetación, mediana, desviación, CWSI, Ig, T^a vegetación- T^a aire, T^a aire, humedad relativa)

Al igual que en el caso de Tudelilla, solo se representaron los datos obtenidos por validación cruzada.

La correlación encontrada entre el potencial hídrico medido y el calculado fueron adecuadas, pero para conseguir mejorar este resultado y simplificar el método se siguieron haciendo diferentes combinaciones entre las 8 variables. Se encontró que con 6 variables mejoraban los resultados.

Las 6 variables que se tuvieron en cuenta fueron:

1. Tª vegetación
2. Mediana de la temperatura de vegetación
3. Desviación estándar de la temperatura de vegetación
4. Índice térmico CWSI
5. Tª aire
6. Humedad relativa

El resultado obtenido se muestra en la figura 18:

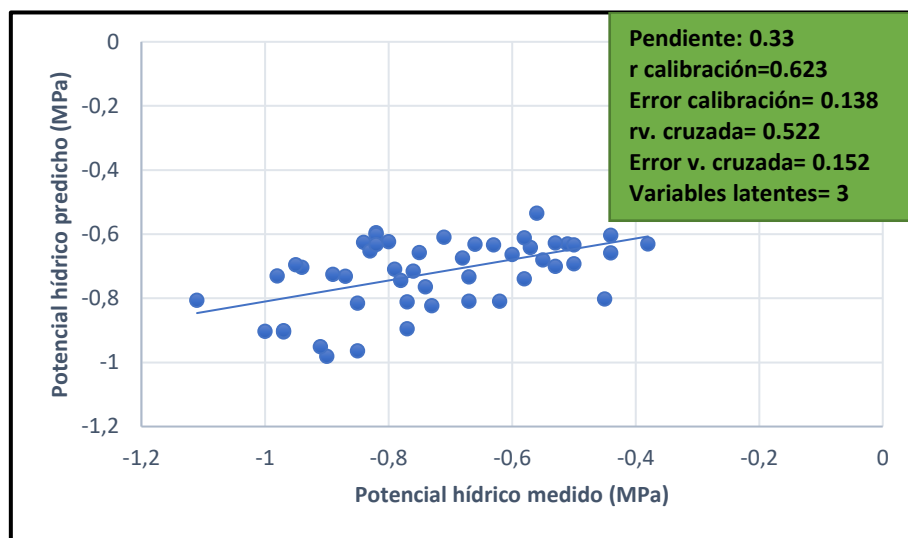


Figura 18: Análisis multivariante de 6 variables (Tª vegetación, mediana, desviación, CWSI, Tª aire, humedad relativa)

En este caso mejoro el coeficiente de correlación para validación cruzada, y también mejoro el error y la pendiente, además de conseguir disminuir en 2 el número de variables, es decir se consiguió predecir el potencial hídrico con mejores resultados y simplificando considerablemente el método.

Se disminuyó el número de variables hasta 3, seleccionando las que mejores resultados habían dado en el caso del viñedo experimental I. En este caso las variables seleccionadas fueron:

1. Tª vegetación
2. Tª aire
3. Humedad relativa.

El resultado obtenido se muestra en la figura 19:

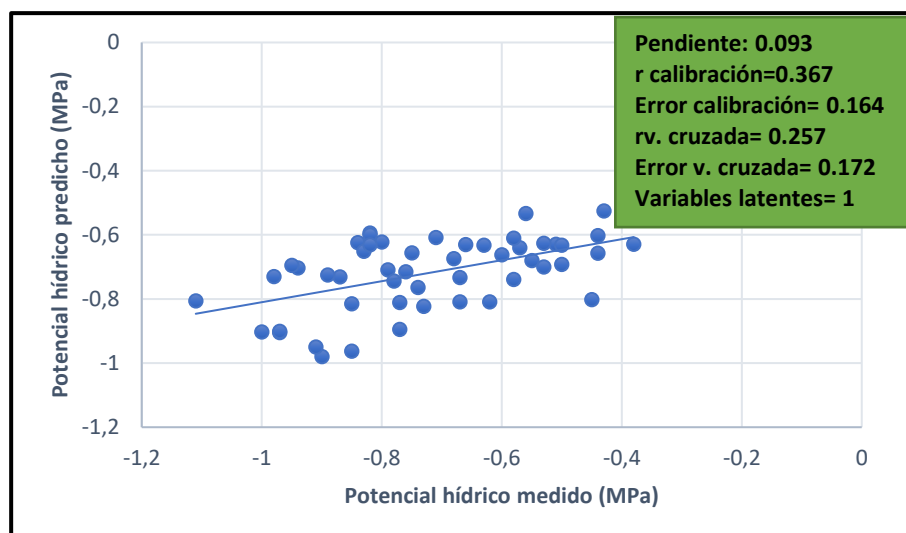


Figura 19: Análisis multivariante de 3 variables (T^a vegetación, T^a aire, humedad relativa)

A diferencia de lo que ocurrió en Tudelilla, los resultados que se obtuvieron teniendo en cuenta la temperatura de la vegetación medida con el sensor, la temperatura del aire y la humedad relativa, no mejoraron los resultados, ya que los coeficientes de correlación eran menores que en el caso anterior, en el que se habían tenido en cuenta 6 variables.

Como en el caso anterior no se consiguió mejorar los resultados, se siguió probando otras combinaciones hasta conseguir mejorar el resultado con 4 variables.

Las 4 variables empleadas fueron:

1. T^a vegetación
2. Desviación estándar de la temperatura de vegetación
3. T^a aire
4. Índice térmico CWSI

En la figura 20 se muestra la gráfica obtenida:

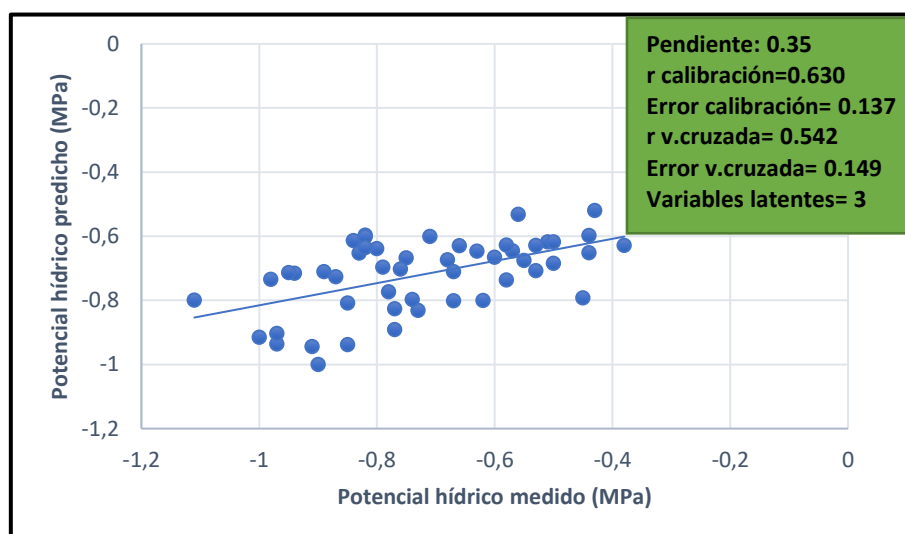


Figura 20: Análisis multivariante de 4 variables (T^a vegetación, desviación, CWSI, T^a aire)

Tanto los coeficientes de correlación, como la pendiente, como el error mejoraron, empleando solo 4 variables. Por tanto, se consiguió simplificar mucho el método y obtener un mejor potencial hídrico de predicción.

Las variables que en este caso más influencia tuvieron a la hora de predecir el potencial hídrico con el sensor radiométrico fueron la temperatura de la vegetación, la desviación estándar de esa temperatura de vegetación, el índice térmico CWSI, y la temperatura del aire. Las 3 primeras variables estaban todas relacionadas con la temperatura de la vegetación, por lo que se puede decir el factor externo que demostró tener una mayor influencia en los resultados fue la temperatura del aire de la zona. En este caso, la temperatura del aire se obtuvo de la estación meteorológica que se encontraba en el mismo viñedo, es posible que si el propio sensor hubiese medido dicha temperatura en el momento exacto en el que se tomaron los resultados, estos mejorarían.

4.2. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA POROSIDAD Y LA PRESENCIA DE FILAS ADYACENTES EN LA MEDIDA DEL POTENCIAL HÍDRICO CON SENSORES RADIOMÉTRICOS:

Por otro lado, se estudió la influencia de ciertas condiciones a la hora de tomar las medidas con el sensor radiométrico. Las condiciones que se estudiaron fueron la influencia de la porosidad, y la influencia de las filas adyacentes a la hora de tomar la medida.

Para este estudio se tomaron con el sensor medidas de la temperatura de la vegetación, en función de distintos niveles de porosidad.

La Figura 21, muestra las temperaturas de la vegetación que fueron medidas en plantas con distintos niveles de porosidad, y que pertenecían a una fila intermedia del viñedo, es decir con filas adyacentes.

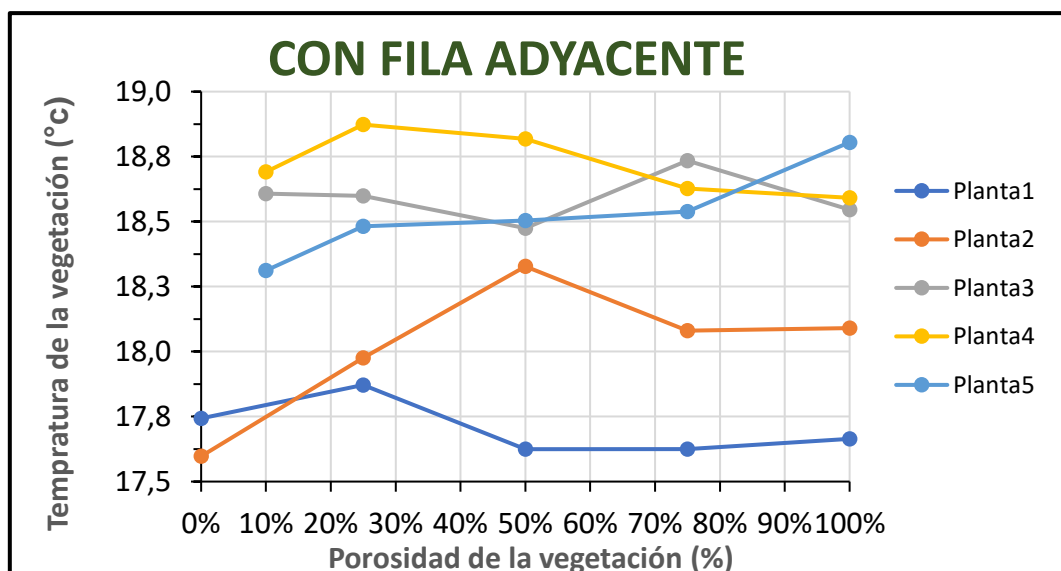


Figura 21: Temperaturas de la vegetación medidas con un sensor radiométrico en plantas con distintos niveles de porosidad, y situadas en una fila intermedia.

Se vio que las temperaturas variaban en función de la porosidad, y con mayores niveles de porosidad se incrementaban, aunque las variaciones de temperatura no eran muy grandes, en todos los casos fueron de menos de 1 ° C.

Para comprobar si realmente la porosidad influía de manera significativa, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), en el que se estudió si había diferencias significativas entre los distintos niveles de porosidad en las diferentes plantas. Los resultados que se obtuvieron del análisis de varianza se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: Datos promedios para la temperatura de la vegetación en función de las diferentes porosidades, en una fila intermedia, con fila adyacente. N= 25, n.s. (no hay diferencias significativas, $p>0.05$).

POROSIDAD (%)	T. (°C) PLANTA 1	T. (°C) PLANTA 2	T. (°C) PLANTA 3	T. (°C) PLANTA 4	T. (°C) PLANTA 5
0	17,74	17,59	18,60	18,69	18,31
10	-	-	18,59	18,87	18,48
25	17,87	17,97	18,47	18,81	18,50
50	17,62	18,32	18,73	18,62	18,53
75	17,62	18,08	18,54	18,59	18,80
100	17,66	18,08	18,60	18,69	18,31
	n.s.	n.s.	n.s	n.s	n.s

El análisis de varianza (ANOVA), confirmó que no existían diferencias significativas entre las temperaturas de las distintas plantas medidas con el sensor, en función de la porosidad.

Se realizó lo mismo para filas del viñedo que se encontraban en los extremos, es decir, sin filas adyacentes, y se estudió como influía la porosidad de la vegetación en estas filas. La figura 22, muestra las diferentes temperaturas de la vegetación medidas con el sensor radiométrico en una fila de los extremos:

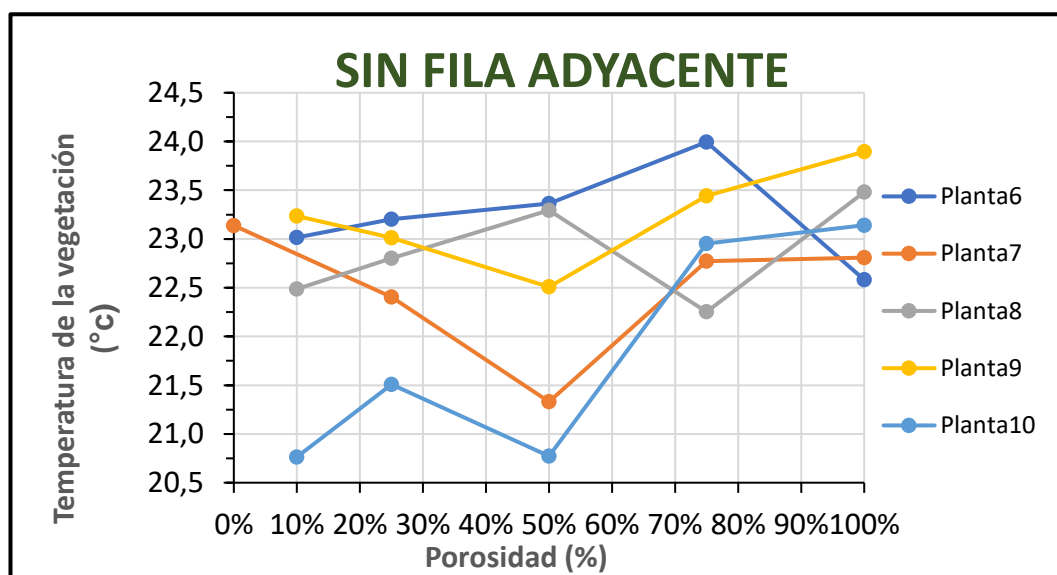


Figura 22: Temperaturas de la vegetación medidas con un sensor radiométrico en plantas con distintos niveles de porosidad, y situadas en una fila adyacente.

Los resultados mostraron que para niveles de porosidad mayores, las temperaturas de la vegetación aumentaban, además, los aumentos de estas temperaturas eran bastante más pronunciados que en el caso de los encontrados en filas intermedias. Esto podía deberse a que al tratarse de filas situadas en los extremos, no hay vegetación detrás y puede que el sensor tome medidas del suelo que se encuentra a mayores temperaturas que la vegetación.

Se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA), para comprobar si existían diferencias significativas en las medidas obtenidas por el sensor en función de la porosidad en las diferentes plantas de la fila adyacente. Los resultados se muestran la tabla 5:

Tabla 5: Datos promedios para la temperatura de la vegetación en función de las diferentes porosidades, en una fila externa, sin fila adyacente. N= 25, n.s. (no hay diferencias significativas, $p>0.05$).

POROSIDAD (%)	T. (°C) PLANTA 1	T. (°C) PLANTA 2	T. (°C) PLANTA 3	T. (°C) PLANTA 4	T. (°C) PLANTA 5
0	-	23,13	-	-	-
10	23,01	-	22,48	23,23	20,76
25	23,20	22,40	22,80	23,01	21,50
50	23,36	21,33	23,29	22,50	20,77
75	23,99	22,77	22,25	23,44	22,95
100	22,58	22,80	23,48	23,89	23,14
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

En el caso de filas situadas en los extremos tampoco se encontraron diferencias significativas entre las diferentes temperaturas de vegetación, ni tampoco se encontró que sus medias fueran significativamente distintas.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son:

1. La temperatura tiende a ascender a medida que el potencial hídrico del viñedo es menor, lo que indica que el uso de la termografía puede ser aplicado como un método no invasivo y de bajo coste para conocer el potencial hídrico a lo largo de un viñedo.
2. Las correlaciones lineales obtenidas entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander frente a la temperatura de la vegetación medida con el sensor radiométrico, así como con los diferentes índices térmicos no fueron buenas en ninguno de los dos viñedos experimentales.
3. En el caso del viñedo experimental I, situado en Tudelilla, no se encontraron diferencias significativas en los diferentes tratamientos de riego que habían sido impuestos, debido a que el verano fue muy lluvioso, lo que compensó los distintos regímenes de riego y las posibles diferencias que se habrían encontrado.
4. La realización de análisis multivariantes, en los que se tienen en cuenta variables que pueden influir a la hora de tomar la temperatura con el sensor radiométrico en continuo, proporcionaron buenas correlaciones entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander, y el potencial hídrico predicho.
5. Es importante simplificar los análisis multivariantes para conocer cuáles son las variables que más influyen en los resultados. En el caso de Tudelilla las dos variables con una mayor influencia son la temperatura del aire y la humedad relativa de esa zona, mientras en Portugal influye más la temperatura del aire.
6. Existen condiciones como la porosidad de la vegetación y la posición de las filas (filas intermedias y filas de los extremos), que pueden influir a la hora de obtener las medidas de temperatura con el sensor radiométrico, aunque en este caso no se encontraron diferencias significativas.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Angella, G., Frías, C., Salgado, R., 2016. Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta.
2. Calvache Ulloa, A., 2002. MANEJO DEL AGUA: PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.
3. Chaves, M.M., Santos, T.P., Souza, C.R., Ortuño, M.F., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology* 150, 237-252.
4. Düring, H., Stoll, M., 1996. Stomatal patchiness of grapevine leaves. II. Uncoordinated and coordinated stomatal movements. *Vitis* 35, 69-71.
5. Grant, O.M., Ochagavía, H., Baluja, J., Diago, M.P., Tardaguila, J., 2016. Thermal imaging to detect spatial and temporal variation in the water status of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 91, 43-54.
6. Grant, O.M., Tronina, L., Jones, H.G., Chaves, M.M., 2007. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany* 58, 815-825.
7. Gutiérrez, S., Diago, M.P., Fernández-Novales, J., Tardaguila, J., 2018a. Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PLOS ONE* 13, e0192037.
8. Gutiérrez, S., Diago, M.P., Fernández-Novales, J., Tardaguila, J., 2018b. Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PLoS ONE* 13.
9. Hallett, J., 2002. *Climate change 2001: The scientific basis*. Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, N. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell and C. A. Johnson. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. 2001. 881 pp. ISBN 0521 01495 6. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128, 1038-1039.
10. Hardie, W.J., Considine, J.A., 1976. Response of grapes to water-deficit stress in particular stages of development.
11. Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27, 59-70.
12. Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55, 2427-2436.
13. Jones, H.G., 2013. *Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*.
14. Jones, H.G., Leinonen, I., 2003. Thermal Imaging for the Study of Plant Water Relations. *Journal of Agricultural Meteorology* 59, 205-217.
15. Miller, E., Klute, A., 1967. *Irrigation of Agricultural Lands*.
16. Neja, R.A., Wildman, W.E., Ayers, R.S., Kasimatis, A.N., 1977. Grapevine Response to Irrigation and Trellis Treatments in the Salinas Valley. 28, 16-26.
17. Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147, 4-20.
18. R. Dry, P., R. Loveys, B., McCarthy, M., Stoll, M., 2001. Strategic management in Australian vineyards.
19. Ritter, A., M. Regalado, C., 2019. EFICACIA DE UN SENSOR DE CAPACITANCIA PARA MEDIR SIMULTÁNEAMENTE SALINIDAD Y CONTENIDO HÍDRICO.
20. Santesteban, L.G., Miranda, C., Royo, J.B., 2011. Suitability of pre-dawn and stem water potential as indicators of vineyard water status in cv. Tempranillo. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 17, 43-51.
21. Scholander, P.F., 1965. Sap pressure: Addendum. *Science* 148, 1488.

22. Sousa, C.d., Jones, H.G., Chaves, M.M., Stoll, M., Grant, O.M., Santos, T., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany* 53, 2249-2260.
23. Williams, L., Araujo, F.J., 2002. Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*.

